

文章编号: 0253-2239(2010)09-2519-05

新型低损耗塑料光纤结构优化的数值分析

陈宏志 于荣金 张庆辉

(燕山大学信息科学与工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要 分析了具有反共振反射的蜘蛛网包层塑料空芯光纤在 $1.3 \mu\text{m}$ 波段的损耗特性及其与结构参数的关系。将光纤包层等效为周期性多层膜,用渐近转移矩阵法进行数值模拟。为优化光纤结构参数,分析了包层层数 N ,高折射率层厚度 d_2 和高、低折射率比值 $n_2:n_1$ 对损耗的影响。计算结果表明,随着 N 的增加,损耗首先快速下降最后达到一个固定值;模式损耗随 d_2 的增加呈线性增大趋势, $n_2:n_1$ 越大,反共振波长处的损耗越低。在此基础上,用模拟退火优化算法对空气层厚 d_1 和纤芯半径 r_{co} 进行了最优化求解。最后,用以上求得结构参数的优化组合即 $N=3$, $d_2=2.648 \mu\text{m}$, $n_2:n_1=1.49:1.0$, $d_1=3 \mu\text{m}$ 和 $r_{\text{co}}=100 \mu\text{m}$, 计算得到最低损耗是 0.449 dB/km 。

关键词 光纤光学;结构优化;模拟退火优化法;反共振反射;蜘蛛网结构包层

中图分类号 TN253 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103009.2519

Numerical Analysis of Structural Optimization of a Novel Low-Loss Plastic Optical Fiber

Chen Hongzhi Yu Rongjin Zhang Qinghui

(College of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

Abstract Loss characteristics of antiresonant reflecting plastic optical fiber with cob-web structural cladding and its relationships with the structural parameters are analyzed in the wavelength $1.3 \mu\text{m}$. The cladding of this optical fiber is equivalent to periodical multilayer films and numerically simulated by asymptotic transfer matrix method. The effects of the number of alternating layers N , the thickness of high-index layer d_2 and index contrast $n_2:n_1$ on the loss characteristics are analyzed to optimize the structural parameters. The numerical simulation results show that the mode loss decreases rapidly in the first and reaches a fixed value in the last as the N increases; the mode losses increase linearly as the d_2 increases; the larger the $n_2:n_1$, the lower the loss at the anti resonant wavelength. On that basis, the thickness of the air layers d_1 and the radius of the hollow core r_{co} are optimized by simulated annealing optimization algorithm. Finally, by using above optimal combination of the structural parameters N_3 , $d_2=2.648 \mu\text{m}$, $n_2:n_1=1.49:1.0$, $d_1=3 \mu\text{m}$ and $r_{\text{co}}=100 \mu\text{m}$, the lowest loss calculated is 0.449 dB/km .

Key words fiber optics; structural optimization; simulated annealing optimization algorithm; antiresonant reflecting; cob-web structural cladding

1 引言

随着光纤通信向接入网的发展,尤其是光纤到家(FTTH)、光纤到桌面(FTTD)等应用的发展,光纤取代铜进入千家万户进而实现信息传输中的“最后一公里”已成必然趋势,塑料光纤由于制造简单、价格便宜、接续方便快捷和具有良好的力学性能等

优点,在高速短距离通信网络中具有明显竞争优势^[1-3],从而引起了业界的关注,特别是塑料光纤在 $100\sim 1000 \text{ m}$ 范围内带宽可达数吉赫兹,而成本与对称电缆相当,使其成为除石英光纤以外的另一种选择。

本文对一种新型的塑料光纤——蜘蛛网结构包

收稿日期: 2009-11-02; 收到修改稿日期: 2009-12-01

基金项目: 国家自然科学基金(60577009)资助课题。

作者简介: 陈宏志(1984—),男,硕士研究生,主要从事塑料光纤数值模拟方面的研究。E-mail: h-z-chen@163.com

导师简介: 于荣金(1935—),男,教授,博士生导师,主要从事集成光学、光纤光学和导波光学等方面的研究。

E-mail: r. j. yu@163.com(通信联系人, 中国光学学会会员号: S040111695)

层空芯塑料光纤^[4,5],应用反共振反射的传输机理,通过转移矩阵法进行数值模拟,分析了这种光纤的损耗与各个结构参数的关系及其变化规律;并运用模拟退火法结合当前光纤制作工艺,进行了结构的优化设计,为实际制作较低损耗的塑料光纤提供了相关的理论依据。

2 空芯光纤传输机理

2.1 布拉格反射

布拉格反射传输机理是1978年加州理工学院Yeh等^[6]提出的一种横向束缚机理,在布拉格光纤中,空芯是由高、低折射率材料交替层组成的一维布拉格反射器包围的。

目前提出的空芯布拉格光纤有“全方位波导”光纤(“OmniGuide”fiber)^[7-10]、环形结构包层光纤^[11],以及蜘蛛网结构包层光纤(图1)。全方位波导光纤的传输损耗显著低于构成光纤材料的损耗,但在材料选择和制作方面存在困难。因此,至今只演示了两种材料组合^[7,12],环形结构空芯光纤包层虽然只用单一材料,但其低折射率层是由含许多小孔的同一材料组成,构成包层的材料折射率差没有蜘蛛网结构包层的材料折射率差大,因而环形结构光纤对导波横向漏泄的束缚能力要小于蜘蛛网结构光纤。

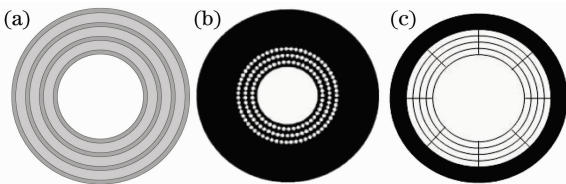


图1 空芯布拉格光纤截面。(a)“全方位波导”光纤; (b)环形结构光纤;(c)蜘蛛网结构光纤

Fig.1 Schematic diagrams of the cross-section of hollow-core Bragg fiber. (a) “OmniGuide” fiber, (b) ring-structured fiber, (c) cobweb structured fiber

2.2 反共振反射

反共振反射光波导(ARROW)是一种可把包层看作为Fabry-Pérot共振器,利用反共振反射导光的新型波导。2002年,由N. M. Litchinitser等^[13]首次提出了反共振反射光子晶体光波导。这种光纤的一维结构与普通平板波导相类似,二维结构与布拉格光纤类似。反共振反射机理可以达到的高折射率层厚度的最大值满足条件为

$$d_2 = \frac{\lambda(2l+1)}{4n_1[(n_2/n_1)^2 - 1]^{1/2}}, l = 0, 1, 2, \dots$$

式中 d_2 是高折射率层厚度, λ 是入射光波长, n_2 和

n_1 分别是高、低折射率层的折射率。反共振反射波导与布拉格波导的区别是:当光子带隙波导的晶格常数大于光波长且高、低折射率差大的时候,这种波导的光谱特性取决于第一高折射率层的厚度,而不取决于晶格常数。在满足反共振条件下,高折射率层可以更厚一些,这样的结构会比较容易制作。

3 反共振反射蜘蛛网包层空芯塑料光纤

对于光纤通信关注的波长 $1.3 \mu\text{m}$ 来说,蜘蛛网结构包层空芯光纤如果要实现低的传输损耗,高折射率层厚度应该选择在传输波长的 $1/4$ 左右,即 $0.325 \mu\text{m}$ 左右,这样的厚度对于当前的塑料光纤制作工艺来说是较难实现的。但是如果将反共振反射引入蜘蛛网结构包层空芯光纤,可以实现高折射率层厚度的增加,从而较利于当前工艺实现。这种光纤的横截面结构如图2所示。 N 是由高、低折射率层组成的包层的周期数, r_{co} 是纤芯半径, m 和 W_s 是支撑条的数目和宽度。支撑条在光纤横截面内总是呈圆对称分布且与高折射率层使用相同的介质材料。

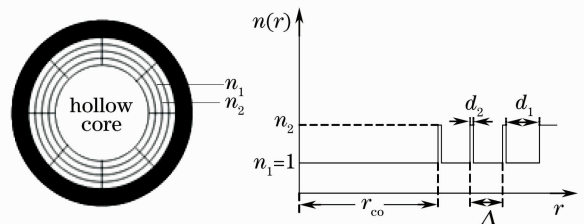


图2 蜘蛛网结构包层空芯光纤结构

Fig.2 Hollow-core fiber with cobweb cladding structure

蜘蛛网结构包层中在各包层之间加上支撑条主要起到力学上的支撑作用,这些支撑条在满足力学稳定性的条件下,其数目和宽度应尽可能地小。大体上,当支撑条的数目 $m=6\sim 12$,且宽度与高折射率层厚度相等时,大部分光被限制在纤芯中传输且满足力学稳定性。对于蜘蛛网包层结构光纤,虽然存在的支撑条结构对于光纤的性能有一定的影响而使光纤中的场分布发生畸变,但是经过模拟计算得知,当支撑条的数量和宽度满足上述的条件时,就可以忽略它的存在,得到较好模拟结果^[5]。这样一来,这种光纤蜘蛛网结构的包层在大芯径的条件下忽略了各层之间的支撑条,从而使包层结构变成由高低折射率层组成的周期性膜堆,即等效成周期性多层膜,用渐近转移矩阵法对其损耗特性进行数值模拟。

对于给定的波长,例如光通信常用波长 $\lambda =$

1.3 μm , 在满足(1)式条件下, 当 $\lambda=1.3 \mu\text{m}, n_1=1, n_2=1.49$ (PMMA) 时, $d_2=0.294 \mu\text{m}, \dots, 2.648 \mu\text{m}$ ($l=4$), $3.237 \mu\text{m}$ ($l=5$), $3.825 \mu\text{m}$ ($l=6$)。为了检验上述参数是否满足反共振反射模型有效性, 用以上参数求得 $2d_2(n_2^2-n_1^2)^{1/2}=5.92 \mu\text{m}$ 。这个结果显示在短波长区 $\lambda=1.3 \mu\text{m}$ ($\lambda < 5.92 \mu\text{m}$), 基模被反共振反射机理很好地束缚在纤芯区域。

4 结构优化的数值分析

4.1 损耗与包层层数的关系

对于“全方位波导”光纤来说, 包层层数对损耗的影响是明显的。光纤达到一定的泄漏速率只需要几层, 且各模式之间泄漏很不相同, 从而产生一种模式滤波效应, 可以在大芯径下以等效单模方式工作。TE₀₁模是最低损耗模。具有反共振结构蜘蛛网包层空芯光纤的数值模拟结果也显示了这些特性。根据塑料光纤常用材料 PMMA 的情况下, 对这种光纤的模式损耗与包层层数的关系进行计算分析, 在 1.3 μm 波长处, PMMA 的吸收损耗为 $2.5 \times 10^4 \text{ dB/km}$, 结构参数为 $n_1=1, n_2=1.49, d_1=5 \mu\text{m}, d_2=2.648 \mu\text{m}, r_{\text{co}}=62.5 \mu\text{m}$, 模拟结果如图 3 所示, 其中虚线是数值拟合结果。

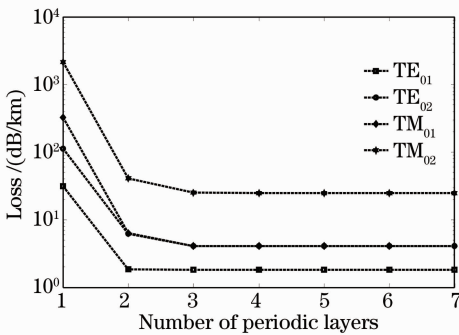


图 3 不同模式损耗与包层周期数的关系
Fig. 3 Relation between the loss of different modes and the number of alternating layers in cladding

通过观察发现, 对于这种新型包层结构的光纤来说, 泄漏损耗随着包层层数的增加下降很快, TE₀₁模要达到一个较低的泄漏损耗, 仅需要 2 层; 计算的 4 种模式的损耗在 $N=3$ 时, 都基本上达到一个固定值, 不再随包层层数的增加而变化。在 $N=3 \sim 7$ 过程中, TE₀₁ 模, TE₀₂ 模, TM₀₁ 模和 TM₀₂ 模的损耗分别稳定在 1.822, 6.102, 4.064 和 24.92 dB/km, TE₀₁ 模的损耗明显低于其他 3 种模的损耗。因此, 依靠模式滤波效应仅需要 3 层就可以实现 TE₀₁ 模的等效单模传输。

4.2 损耗与高折射率层厚度的关系

假定将空气层的厚度固定, 主要考虑高折射率层厚度变化对损耗的影响, 即固定 $d_1=5 \mu\text{m}$, 仍根据 PMMA 在 1.3 μm 波长处的吸收损耗, 通过改变 d_2 , 来观察损耗的变化。 d_2 为满足(1)式的一系列离散值, 这些离散值均满足反共振条件, 在 1.3 μm 波长光纤可以取得最小的损耗。图 4 给出了取 $l=4 \sim 40$ 情况下, 模式损耗与高折射率层厚度的关系曲线。

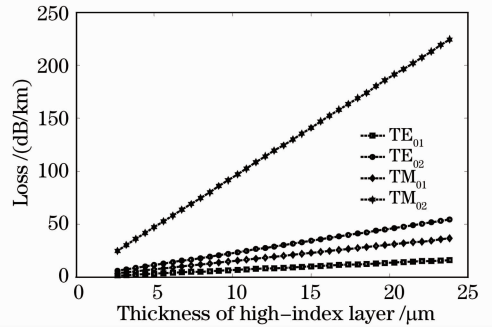


图 4 不同模式损耗与高折射率层厚度的关系
Fig. 4 Relation between the loss of different modes and the thickness of high-index layers

计算结果显示, 随着高折射率层厚度的增加, 在 d_2 从 2.648 μm 增大到 23.83 μm 过程中, 各个模式的损耗大体增加到原来的近 10 倍。TE₀₁ 模的损耗 1.82 dB/km 增大为 16.33 dB/km, 增大了 8.96 倍; 其变化曲线是斜率为 0.685 的直线; 其他 3 个模式 TE₀₂, TM₀₁ 和 TM₀₂ 的损耗变化趋势与 TE₀₁ 模类似, 斜率分别是 2.292, 1.538 和 9.385。虽然在制造过程中 d_2 越大, 即高折射率层厚度越大, 越易于工艺实现, 但在反共振反射机理中 d_2 同时也增大了传输损耗, 并且对光谱特性有明显影响, 如图 5 所示, 在 $d_2=4.414, 6.179 \mu\text{m}$ 时光谱振荡周期分别是 $d_2=2.648$ 时的 1/2, 1/4, 所以 d_2 是光纤传输的光谱特性必须考虑的重要因素。

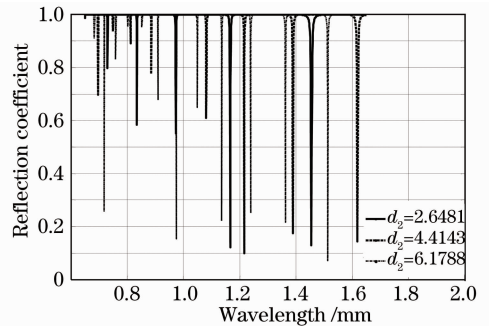


图 5 不同高折射率厚度时的 TE₀₁ 模光谱特性
Fig. 5 Spectral characteristics of TE₀₁ mode with different thicknesses of high-index layer

4.3 损耗与包层折射率比值的关系

基于光纤损耗与包层周期数的关系,模拟中均设定为3个周期包层,但选择三种不同的折射率比,观察包层折射率差值对反共振反射光纤损耗的影响。图6给出了高、低折射率的比值分别为1.49:1.4, 1.4:1.0及1.49:1.0的模拟结果。由于折射率比值改变,反共振波长出现的位置也改变。可以看出,随着包层折射率比值逐步增大,反共振波长的损耗均不同程度地下降,且将低折射率层变换成空气时对光纤模式损耗影响是显著的,使得 TE_{01} 模在 $1.3\ \mu\text{m}$ 波长传输损耗的最小值由1.49:1.4时的 $1.027 \times 10^4\ \text{dB/km}$ 降低到了低于 $1.822\ \text{dB/km}$ 。

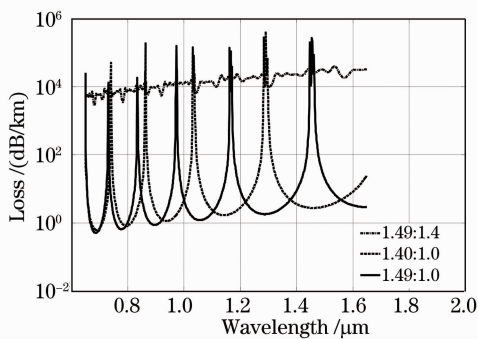


图6 包层折射率差与损耗的关系

Fig. 6 Relationship between the loss and index contrast in claddings

因此可得出结论:对于反共振反射蜘蛛网包层空芯光纤,包层折射率差值越大,其损耗越小;包层折射率差值越小,其损耗越大。

4.4 结构优化

以上三个结构参数所取的值是一些满足特定条件的离散值,其与损耗的关系通过不同取值的对比分析即可获得。而对于反共振反射蜘蛛网包层空芯光纤,它的另外两个连续结构参数 r_{co} 和 d_1 的变化对于光纤损耗也具有较大的影响。采用使得损耗取得最小值的参数组合,通过最优化计算方法就可以获得这些连续结构参数的最优化取值^[14],根据蜘蛛网包层空芯光纤损耗变化曲线的特点,选用了适于处理多变量极值问题的模拟退火优化算法。

取 $N=3$, $d_2=2.648\ \mu\text{m}$,并考虑到材料在 $1.3\ \mu\text{m}$ 的吸收损耗 $2.5 \times 10^4\ \text{dB/km}$,已算出 TE_{01} 模在 $1.3\ \mu\text{m}$ 波长处的损耗是 $1.822\ \text{dB/km}$,在这个基础之上再进行优化。先求出 $N=3$ 时的光纤损耗函数表达式,该表达式中有两个自变量,分别是 d_1 和 r_{co} ,表达式中 d_1 对损耗影响小, r_{co} 的增大使损耗非线性下降;然后设定这两个自变量满足的反共

振条件,即它们各自的合理取值取值范围;再用模拟退火优化算法计算 d_1 和 r_{co} 取得不同初值时的最优化组合。通过编程计算可得,当 d_1 和 r_{co} 两个自变量组合分别取不同初值 $[5, 62.5]$, $[1.5, 50]$ 和 $[3, 100]$ 时,用模拟退火优化算法得到的最优化组合是 $[4, 100]$,其对应的损耗值是 $0.449\ \text{dB/km}$ 。

由计算结果可知,当 x_0 取不同初值时,模拟退火优化算法所得的点为全局最小值点;与原来的结构参数计算所得的损耗值比较,其得到的损耗值相对较低。由此可得 d_1 的最优取值为 $3\ \mu\text{m}$, r_{co} 的最优取值为 $100\ \mu\text{m}$,相应的最低损耗为 $0.449\ \text{dB/km}$ 。

5 光纤制作工艺及容差

蜘蛛网结构包层空芯塑料光纤属于微结构光子晶体光纤^[15,16],这种光纤可使用PMMA材料通过挤出法或预制棒法来制作。前者技术较成熟且效率高,适合大批量工业生产;而后者可以使用多种不同的材料和制作方法,灵活、多样、方便,适合制作光子晶体光纤和实验室试制样品。目前实验室正在采用预制棒法制作这种光纤。最初的预制棒由挤出机挤出,并将其拉制成直径约 $1\ \text{cm}$ 的杆;然后将这个杆插入到一个PMMA套管里,再将其拉制成直径 $300\sim 500\ \mu\text{m}$ 的光纤。拉制过程中,需根据PMMA的力学和热学性能精确控制拉丝温度和拉丝速度并掌控拉丝时间,以保证光纤预制棒被拉细后的结构。

图7是 TE_{01} 模损耗与不同PMMA层厚度间的关系,从图中可以看到该光纤高折射率层的制作容差。当光纤PMMA层厚度为 $2.648\ \mu\text{m}$ 时,损耗最低。在此基础上,厚度增加 $0.104\ \mu\text{m}$ 或减少 $0.083\ \mu\text{m}$ 时,损耗均增大1.3倍。因此,该光纤高折射率层厚度为 $2.648\ \mu\text{m}$ 时,制作容差为 $\pm 0.083\ \mu\text{m}$ 。相对容差约为 $1/32$ 。当前塑料光纤制

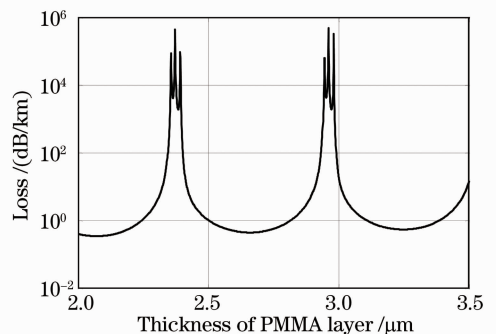


图7 损耗与PMMA层厚度的关系

Fig. 7 Relationship between loss and thickness of PMMA layer

作工艺的最低相对容差在 1/31 左右,与上述光纤的相对容差接近,所以这种结构的光纤是可以当前工艺来实现的。

6 结 论

将反共振反射引入蜘蛛网包层空芯光纤,可以实现高折射率层厚度的进一步增大。在忽略支撑条的情况下,用渐近转移矩阵法对光纤损耗进行数值模拟,分别得到了包层周期数 N 、高折射率层厚度 d_2 和高、低折射率比值 $n_2:n_1$ 与光纤损耗的变化关系曲线,基本确定了结构参数 $N=3, d_2=2.648 \mu\text{m}$ 和 $n_2/n_1=1.49:1.0$ 。在取离散值的结构参数分析的基础上,用模拟退火最优化算法,求得了另外两个连续的结构参数 d_1 和 r_{co} 的最优化组合解,分别为 $3 \mu\text{m}$ 和 $100 \mu\text{m}$,由这些结构参数得到的最低损耗是 0.449 dB/km 。

参 考 文 献

- 1 Yang Chun, Sun Xiaohan, Wang Yunming *et al.*. 1×7 cylindrical mixing-rod plastic optical fiber coupler [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(9): 1116~1122
杨春, 孙小菡, 王云明等. 1×7 圆柱形混合棒塑料光纤耦合器[J]. *光学学报*, 2001, **21**(9): 1116~1122
- 2 Yu Rongjin. Plastic optical fiber for communication [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2002, **13**(3): 315~320
于荣金. 塑料通信光纤[J]. *光电子·激光*, 2002, **13**(3): 315~320
- 3 Zhang Yongsheng, Xie Zhiguo, Zheng Yongsheng *et al.*. Mode coupling in polymer optical fiber and its enhancement to transmission bandwidth [J]. *Chinese J. Lasers* 2006, **33**(9): 1234~1238
张永生, 谢志国, 郑荣升等. 聚合物光纤中的模式耦合及其对带宽的提高[J]. *中国激光*, 2006, **33**(9): 1234~1238
- 4 Yu Rongjin, Zhang Bing. Functional exploration of plastic optical fiber of a new generation [J]. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 2008, **38**(5): 807~816

- 于荣金, 张冰. 新一代塑料光纤及其功能开发[J]. *中国科学 E 辑: 技术科学*, 2008, **38**(5): 807~816
- 5 M. Y. Chen, R. J. Yu, Z. G. Tian *et al.*. Optical and mechanical properties of hollow-core fibers with cobweb cladding structure [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(2): 63~65
- 6 P. Yeh, A. Yariv, E. Marom. Theory of Bragg fiber [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1978, **68**(9): 1196~1201
- 7 Y. Yink, J. D. Ripin, S. Fan *et al.*. Guiding optical light in air using an all-dielectric structure [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(11): 2039~2041
- 8 S. G. Johnson, M. Ibanescu, M. Skorobogatiy *et al.*. Low-loss asymptotically single-mode propagation in large-core Omniguide fibers [J]. *Opt. Express*, 2001, **9**(13): 748~779
- 9 B. Temelkuran, S. D. Hart, D. Benoit *et al.*. Wavelength scalable hollow-core optical fibers with large photonic bandgaps for CO₂ laser transmission Perfect mirror extend hollow-core fiber and application: low-loss wave guides based on omnidirectional [J]. *Nature*, 2002, **420**(6916): 650~653
- 10 G. Delleman, T. D. Engeness, M. Skorobogatiy *et al.*. mirrors can transport light of almost any wavelength [J]. *Photon. Spectra*, 2003, **37**(June): 60~62
- 11 A. Alexander, I. M. B. A. Martijn van Eijkelenborg *et al.*. Ring structures in microstructured polymer optical fibres [J]. *Opt. Express*, 2001 **9**(13): 813~820
- 12 A. Argyros, Eijkelenborg M A van, M. C. J. Large *et al.*. Hollow-core microstructured polymer optical fiber [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(2): 172~174
- 13 N. M. Litchinitser, A. K. Abeeluck, C. Headley *et al.*. Antiresonant Reflecting Photonic Crystal Optical Waveguides [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(18): 1592~1594
- 14 Gong Chun, Wang Zhenglin. Proficient in MATLAB optimization calculation [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009: 160~174
龚纯, 王正林. 精通 MATLAB 最优化计算[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009, 160~174
- 15 Zhang Xiaojuan, Zhao Jianlin, Cui Li *et al.*. Analysis of mode properties of photonics crystal fiber with high birefringence [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1379~1383
张晓娟, 赵建林, 崔莉等. 一种高双折射光子晶体光纤的模式特性分析[J]. *光学学报*, 2008, **28**(7): 1379~1383
- 16 Wei Yan, Chang Deyuan, Zheng Kai *et al.*. Numerical simulation of temperature properties of photonics crystal fibers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(7): 945~951
卫延, 常德远, 郑凯等. 光子晶体光纤的温度特性数值模拟 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(7): 945~951